

ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS PRÓTESIS DE MANO

Jofre L. Brito^{1,*}, Marlon X. Quinde², David Cusco³ y John I. Calle⁴

Resumen

En este artículo se hace una revisión de los tipos de prótesis de mano que se han desarrollado con diferentes tipos de tecnologías, incluyendo ventajas y desventajas de su utilización. Se presenta la evolución tecnológica de las prótesis de mano durante estos últimos años. Finalmente se hace referencia a las nuevas tendencias en la utilización de materiales inteligentes para la construcción de prótesis de mano.

Palabras clave: Prótesis de mano, control, grados de libertad, mioeléctrica, materiales inteligentes.

Abstract

This article is a review of the types of prosthetic hands have been developed with different technologies, including advantages and disadvantages of their use. We present the technological evolution of prosthetic hands in recent years. Finally, reference is made to the new trends in the use of smart materials for the construction of prosthetic hand.

Keywords: Hand prosthesis, control, freedom degrees, myoelectric, smart materials.

^{1,*}Estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana. Autor para correspondencia ✉: jbritog@est.ups.edu.ec

²Colaborador del Grupo de Investigación en Materiales (GIMA – CIDII), estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.

³IEEE Member Student, estudiante de la Carrera de Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica Salesiana

⁴Máster en Gestión y Auditorías Ambientales, Ingeniero mecánico, estudiante de Doctorado en Ingeniería de Proyectos, Universidad Tecnológica de Panamá, Docente y miembro del CIDII Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Autor para correspondencia ✉: jcalle@ups.edu.ec

Recibido: 20-05-2013, Aprobado tras revisión: 03-06-2013.

Forma sugerida de citación: Brito, J.; Quinde, X.; Cusco, D. y Calle, J. (2013). "Estudio del estado del arte de las prótesis de mano". INGENIUS. N.º 9, (Enero-Junio). pp. 57-64. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

La mano del hombre es considerada como una herramienta mecánica y sensitiva [1] [2], siendo el principal órgano de manipulación física gracias a sus dos funciones principales de presión y tacto que le permiten realizar movimientos y manipulación de objetos [3] [4]. Gran parte de los movimientos se atribuyen al dedo pulgar la facilidad de rotar 90° [5]; este dedo es el de mayor funcionalidad y la pérdida del mismo reduce un 40 % [6] la capacidad de funcionalidad de la mano [7].

Una prótesis de mano tiene como finalidad ayudar a proporcionar algunas funciones pero jamás remplazar un miembro faltante del cuerpo del ser humano que se perdió por diferentes situaciones [8] [9]; uno de los objetivos de la construcción de las mismas es mejorar la calidad de vida de los pacientes amputados [10].

La fabricación de prótesis de mano es un acontecimiento que se ha venido realizando desde hace muchos años atrás [6] [11], se tiene como registro que la primera prótesis de mano fue desarrollada por el año 2000 a. C. [8] [3] [12]. Por el siglo XVI existen grandes avances con la prótesis del francés Ambroise Paré [13] [3], en el siglo XX el médico francés Gripoulleau colaboró con accesorios prostéticos terminales y finalmente para el año 1912 Dorrance fabricó el Hook [7], cuyo objetivo era regresar al paciente amputado a la vida laboral. Actualmente entre los países con el mayor desarrollo tecnológico de prótesis de mano están Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón [3].

Para el diseño y construcción de una prótesis de mano se involucran varias áreas de la ingeniería mecánica y electrónica como diseño de mecanismos, mecanizado de materiales, diseño del control, programación del control juntamente con el interfaz entre el hombre y máquina [8]. En años recientes muchos esfuerzos han sido consolidados al diseño, construcción y control de prótesis de mano [14] [15], con diferentes tipos de mecanismos y control, utilizando una variedad de materiales modernos aprovechados por la tecnología actual [3] [7].

El objetivo de este artículo es identificar los alcances logrados en el diseño y construcción de prótesis de mano en los últimos años; para ello se comienza clasificando los tipos de prótesis de acuerdo a su característica fundamental, luego se realiza una investigación del estado de arte de las prótesis de mano actualmente desarrolladas y finalmente se habla de los tipos de materiales que se utilizan en la construcción de las prótesis de mano.

2. Tipos de prótesis de mano

En la elección de la prótesis a utilizar existen varios factores que influyen directamente como el nivel de

amputación, el tipo de displasia de la que se trate, la funcionalidad de la misma y finalmente el factor económico [16] que es indispensable en el momento de adquirir la prótesis.

Existen varios tipos de prótesis de mano [17] [18] que se han desarrollado utilizando diferente tecnología y conocimiento.

2.1. Prótesis estéticas

Las prótesis estéticas, conocidas como prótesis pasivas [19] [20], no tienen movimiento y solo cubren el aspecto estético del miembro amputado, en la fabricación de las mismas se emplean polímeros como PVC rígido, látex flexible o silicona [9] [21], estos materiales son empleados por ser más livianos y requieren de menos mantenimiento, ya que no disponen de piezas móviles [22], como se observa en la Figura 1.

2.2. Prótesis mecánicas

Las prótesis mecánicas cumplen funciones básicas como la apertura y cerrado de la mano, limitadas al agarre de objetos grandes y movimientos imprecisos [7] [22], la señal mecánica es obtenida por medio de otro miembro del cuerpo como el codo o hombro [9] [20], como se muestra en la Figura 2, para ello se implementa un arnés colocado en la espalda el cual generará la movilidad de la prótesis a través de una liga [3] [23] [24].



Figura 1. Prótesis estéticas [21].

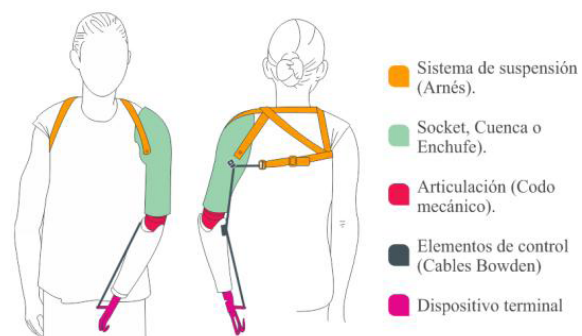


Figura 2. Prótesis mecánicas [23].

2.3. Prótesis eléctricas

Las prótesis eléctricas se basan en el uso de motores eléctricos, que pueden ser controlados por medio de servo-contróles, pulsantes o interruptores [9] [25], su principal desventaja es su reparación, su alto costo y su exposición a ambientes hostiles así como también su peso [7] [4] [26]. En la Figura 3 se puede observar una prótesis eléctrica de la compañía Otto Bock que tiene como principal ventaja el agarre de objetos rápidamente y con precisión de forma activa gracias a los sensores en los dedos [19] [22].



Figura 3. Prótesis eléctricas [19].

2.4. Prótesis neumáticas

Las prótesis neumáticas hacen uso de aire a presión obtenido por medio de un compresor, su ventaja principal es proporcionar una gran fuerza y rapidez de movimientos; sus desventajas principales son los dispositivos que se implementan para su control y funcionamiento ya que son relativamente grandes y su mantenimiento es costoso y dificultoso [22] [4]. En la Figura 4, tenemos la prótesis neumática Shadow.



Figura 4. Prótesis neumáticas [4].

2.5. Prótesis mioeléctricas

Las prótesis mioeléctricas son en la actualidad una de las de mayor aplicación en el mundo, ya que brindan un mayor grado de estética y un elevado porcentaje de precisión y fuerza, basándose en la obtención de señales musculares [9] [27] [28] las mismas que son obtenidas mediante el uso de electrodos que permiten la extracción de la señal que es amplificada, procesada y filtrada al control para el manejo de la prótesis [3] [22] [29]. En la Figura 5 tenemos las partes de la prótesis mioeléctrica.

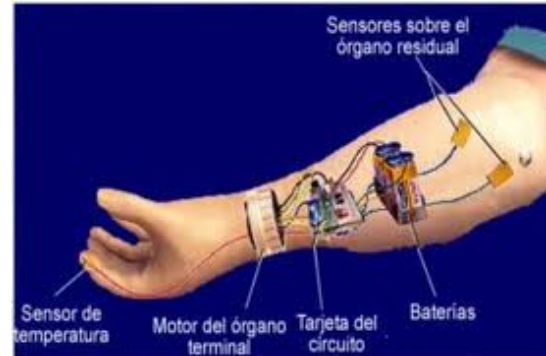


Figura 5. Partes de la prótesis mioeléctrica [3].

2.6. Prótesis híbridas

Las prótesis híbridas son utilizadas por personas que tienen amputaciones desde arriba del codo, ya que combina la acción del cuerpo con el accionamiento por electricidad [7]. Es muy frecuente en las prótesis híbridas que utilicen un codo accionado mediante el cuerpo y un dispositivo al final controlado en forma mioeléctrica, que puede llegar a ser un gancho o una mano [22] [3], como se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Prótesis híbrida [22].

3. Evolución tecnológica

En estos últimos años, el desarrollo tecnológico ha crecido enormemente [30] y el gran responsable de este avance es el hombre que en su afán de buscar soluciones a los problemas que se presentan en la sociedad, ha logrado dar grandes pasos con el fin de facilitar las condiciones de vida.

En lo que se refiere a la evolución tecnológica de prótesis de mano usando tecnología actual se ha logrado grandes avances [23] permitiendo la fabricación de prototipos que emulan en gran porcentaje los movimientos que la mano humana realiza, entre las prótesis más destacadas mencionamos:

3.1. Prótesis biónica I-Limb

La prótesis biónica I-limb es una de las más utilizadas en la actualidad e implementada en varios países, ya que cumple con la mayoría de los movimientos básicos de la mano que un ser humano común y corriente realiza [31], facilitando al paciente el retorno a la vida laboral y mejorando sus condiciones de vida.

La mano biónica I-limb, cuyos dedos son controlados independientemente [32], permite realizar una gran cantidad de movimientos dado que el pulgar puede rotar hasta 90° [4], hacer pinza y realizar agarres de precisión y de potencia de diferentes formas [22] [8], en la Figura 7 se presenta la I-limb y el dedo con sus partes.

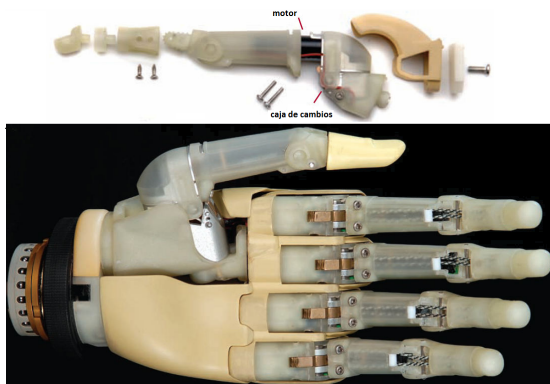


Figura 7. Prótesis biónica I-limb [8].

3.2. Prótesis Michelangelo

La prótesis biónica de Michelangelo, se caracteriza por realizar una gran variedad de movimientos precisos, gracias al control y mecanismos de fuerzas y velocidades de agarre, ya que los dedos son controlados independientemente y el pulgar y la muñeca disponen de movilidad [18].

Internamente está constituida por acero y duraluminio de alta resistencia, externamente recubierta por

elastómero de silicona; principalmente esta prótesis se caracteriza por sus seis grados de libertad y la resistencia al agua [22] [18]. En la Figura 8 se muestra la prótesis Michelangelo.

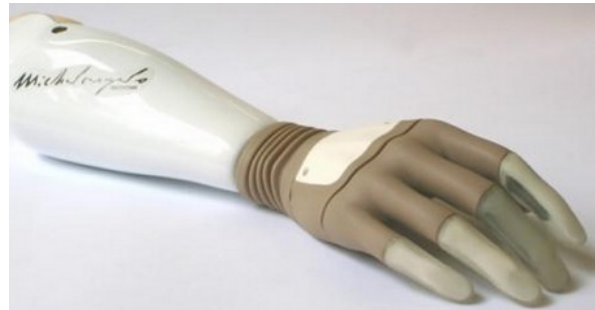


Figura 8. Prótesis Michelangelo [19].

3.3. Prótesis bebionic

La prótesis bebionic con gran parentesco en sus componentes mecánicos a la I-limb [18], construida por Steeper RS tiene la finalidad de emular la funcionalidad de la I-limb pero a un costo más reducido aproximadamente \$10 000 dólares [13]. En la Figura 9, tenemos la prótesis bebionic.



Figura 9. Prótesis bebionic [31].

La última versión bebionic 3, tiene movimientos articulados en las falanges en todos los dedos; con el pulgar en oposición que se coloca manualmente en dos posiciones [11] como se muestra en la Figura 10, permitiéndole obtener catorce posiciones diferentes con los que se consigue agarres precisos [33].



Figura 10. Pulgar en oposición [33].

La prótesis bebionic es controlada por la contracción de los músculos del paciente afectado, tiene cinco actuadores lineales independientes que incorporan cinco velocidades de alta con motores de fuerza y diseñado para un bajo consumo de energía [33].

3.4. Prótesis CyberHand

La prótesis biónica de CyberHand es una con tecnología moderna y costosa, ya que se conecta los electrodos de la prótesis a las terminaciones nerviosas de la mano de la persona amputada mediante una cirugía [34] [35], permitiéndole recoger la información del cerebro mediante sensores, es por ello que al paciente con amputación puede sentir la presión y la temperatura a la que está sometida la prótesis [22] [36], en la Figura 11 se muestra la prótesis CyberHand.

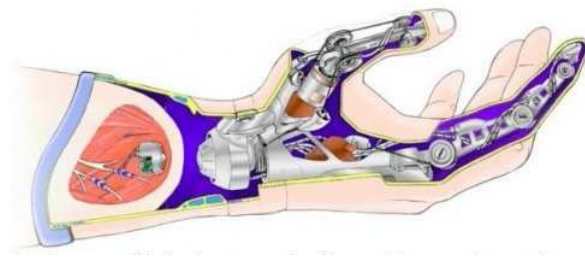


Figura 11. Prótesis CyberHand [37].

4. Utilización de materiales inteligentes en las prótesis

El término inteligente es definido para calificar y describir una variedad de materiales que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas como rigidez, viscosidad, forma y color; con la presencia de un estímulo fijo [7] [38]. Para controlar la respuesta se diseñan mecanismos de control y selección teniendo un tiempo de respuesta muy corto, permitiéndole al sistema que regrese a su estado inicial tan pronto cesa el estímulo

[3] [39]. Como se muestra en la Tabla 1 existe una variedad de materiales inteligentes empleados en el desarrollo de prótesis de mano [4] [40] [41].

Los alambres musculares son delgados y de alta resistencia mecánica, fabricados con aleaciones de níquel y titanio [38] [42] [43]; es una de las aleaciones con memoria más utilizadas en la fabricación de prótesis de mano [3] [7] [44].

En un futuro próximo la tendencia a la investigación y búsqueda de nuevos materiales que cumplan las expectativas y necesidades como la resistencia, compatibilidad, durabilidad, peso y a un bajo costo aumentarán [38], esto conjuntamente con el empleo de nuevos sistemas de control permitirá la construcción de prótesis de mano emulando a su equivalente natural.

5. Conclusiones

La fabricación de prótesis de mano se ha venido desarrollando desde hace siglos atrás, pero en los últimos años con el avance de la tecnología se ha logrado grandes avances con métodos y técnicas de modelamiento y diseño de mecanismos, acompañado de la gran variedad de materiales y control automatizado que juntamente con el interfaz máquina-hombre permiten desarrollar y obtener prótesis que emulen en funcionalidad los movimientos que desempeña la mano del ser humano.

En los recientes años los avances en la biomecánica humana han permitido la fabricación de prótesis de mano con un alto desempeño en simulación de movimientos y con gran apariencia natural, siendo capaz de recibir señales desde el cerebro del ser humano. Sin embargo, los costos de estas prótesis son elevados e inalcanzables para los usuarios, por lo que se opta en utilizar prótesis estéticas, prótesis mecánicas con un gancho o definitivamente aceptar la displacia y no utilizar ningún medio prostético.

En Ecuador, se están desarrollando proyectos impulsados por el Gobierno actual para la fabricación de prototipos de prótesis, pero estas no brindan confiabilidad ya que no realizan los movimientos necesarios para que el paciente pueda realizar su actividad con alto nivel de confiabilidad.

La evolución hacia la fabricación de una prótesis que cumpla todas las expectativas tanto en funcionalidad como en costo, ocurrirá posiblemente en un plazo de pocas décadas; para lograr una prótesis de esa magnitud se requerirán de grandes esfuerzos interdisciplinarios de la ingeniería, que junto con la tecnología permitirán superar debilidades y desventajas presentes en las prótesis actuales.

Materiales con memoria de forma	Aleaciones con memoria de forma
	Polímeros con memoria de forma
	Cerámicos con memoria de forma
	Aleaciones con memoria de forma ferromagnéticos
Materiales electro y magnétoactivos	Materiales electro y magnetereológicos
	Materiales piezoeléctricos
	Materiales electro y magnetorestrictivos
Materiales fotocromáticos	Fotoactivos
	Electroluminiscentes
	Fluorescentes
	Fosforescentes
	Cromoactivos
	Fotocromáticos
	Termocromáticos
	Electrocromáticos

Tabla 1. Materiales inteligentes [7] [22] [38] [42].

Referencias

- [1] A. I. Kapandji, *Fisiología Articular*, 6th ed. Madrid, España: Editorial médica Panamerica, 2006, no. 1.
- [2] J. Pedreño Molina, A. Guerrero González, and J. López Coronado, “Estudio de los sensores táctiles artificiales aplicados a la robótica de agarre,” p. 9. [Online]. Available: <http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXI/documentos/003.pdf>
- [3] J. M. Dorador Gonzáles, P. Rios Murillo, I. Flores Luna, and A. Juárez Mendoza, “Robótica y prótesis inteligentes,” *Revista Digital Universitaria UNAM*, vol. 6, no. 1, p. 15, 2004. [Online]. Available: <http://www.revista.unam.mx/vol.6/num1/art01/int01.htm>
- [4] V. Bundhoo, “Design and evaluation of a shape memory alloy-based tendondriven actuation system for biomimetic artificial fingers,” Master of applied science in the Department of Mechanical Engineering, University of Victoria, 2009.
- [5] H. Rouviere and A. Delmas, *Anatomía Humana*, 11th ed. Barcelona, España: Masson, 2007, no. 3.
- [6] J. T. Belter and A. M. Dollar, “Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands,” *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–7, 2011.
- [7] J. L. Loaiza and N. Arzola, “Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano,” no. 169, pp. 191–200, Agosto 2011. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a22v78n169.pdf>
- [8] L. Puglisi and H. Moreno, “Prótesis robóticas,” p. 10.
- [9] P. Richard F, ff. Weir, “Design of artificial arms and hands for prosthetic applications,” in *Standard handbook of biomedical engineering and design*. Chicago, Illinois: Digital Engineering Library McGraw-Hill, 2004, ch. 32.
- [10] C. A. Silva Castellanos, J. E. Muñoz Riaño, D. A. Garzón Alvarado, N. S. Landínez Parra, and O. Silva Caicedo, “Diseño mecánico y cos-mético de una protésis parcial de mano,” *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, no. 1, p. 25, Jan./Mar. 2011.
- [11] J. T. Belter, J. Segil, A. M. Dollar, and R. F. ff. Weir, “The mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands,” *JRRD*, pp. 1–40. [Online]. Available: <http://www.eng.yale.edu/grablab/pubs/BelterJRRD2012.pdf>
- [12] K. Norton, “Un breve recorrido por la historia de la protésica,” *inMotion*, vol. 17, no. 7, pp. 1–5, Noviembre-Diciembre 2007. [Online]. Available: <http://www.amputee-coalition.org/spanish/inmotion/novdec07/historyprosthetics.html>
- [13] M. F. Guay, “Analyse cinemato-statique d’un doigt sous-actionné á 3 ddl pour une prothése de membre supérieur,” Maître es sciences, Université Laval, 2012. [Online]. Available: <http://www.theses.ulaval.ca/2012/28618/28618.pdf>
- [14] P. Dudley S., Childress, “Historical aspects of powered limb prostheses,” pp. 2–13. [Online]. Available: <http://www.oandplibrary.org/cpo/pdf/198501002.pdf>

- [15] A. Vivas and E. Aguilar, "Modelado geométrico y dinámico de una prótesis de mano robótica," pp. 1–6.
- [16] B. Vishalini, "Design and evaluation of a shape memory alloy-based tendondriven actuation system for biomimetic artificial fingers," Master of applied of science in the Department of Mechanical Engineering, University of Mauritius, 2009.
- [17] J. C. Díaz Montes and J. Dorador González, "Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano," pp. 335–345, Septiembre 2009.
- [18] M. A. Pérez Romero, "Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servo-articulada aplicable como prótesis," Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad en Diseño Mecánico, Instituto Politécnico Nacional, Julio 2011. [Online]. Available: <http://www.biblio-sepi.esimez.ipn.mx/mecanica/2011/Analisis>
- [19] L. Giuseppe, "The study of the electromyographic signal for the control of a prosthetic hand," Master's Degree in Computer Science Engineering Department of Electronics and Computer Science Engineering, Politecnico di Milano, 2009-2010. [Online]. Available: <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/2282/1/201007Lisi.pdf>
- [20] J. Trujillo Covarrubias and V. E. González López, "Las prótesis mecánicas," México, p. 7, 2010.
- [21] M. inStep 2005, "The art of making artificial limbs look lifelike," pp. 1–8, 2005. [Online]. Available: <http://www.amputee-coalition.org/spanish/easyread/military-instep/cosmesis-ez.html>
- [22] C. A. Quinayés Burgos, "Diseño y construcción de una prótesis robotica de mano funcional adaptada a varios agarres," Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayan, Colombia, 2010.
- [23] J. Ramírez Díaz de León, R. I. Flores Luna, M. García del Gállego, and J. M. Dorador González, "Rediseño de interfaz para prótesis mecánica transhumeral," pp. 389–395, Septiembre 2011. [Online]. Available: <http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2011/pdfs/A1/A1240.pdf>
- [24] E. Garibay Castañeda, R. I. Flores Luna, F. Cuenca Jimenez, and J. M. Dorador González, "Diseño de un sistema amplificador de fuerza para prótesis mecánica," pp. 216–225, Septiembre 2012. [Online]. Available: <http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/1031/Publica20130209211223.pdf>
- [25] H. Barouti, M. Agnello, and P. Volckmann, "Amputaciones del miembro superior," *Enciclopedia Médico Quirúrgica*, p. 10, 1998. [Online]. Available: <http://www.discapacidadonline.com/wp-content/uploads/2011/05/manual.amputado.miembro.superior.pdf>
- [26] J. Yang, E. Pena Pitarch, K. Abdel Malek, A. Patrick, and L. Lindkvist, "A multifingered hand prosthesis," *Mechanism and Machine Theory*, pp. 555–581, Enero 2004. [Online]. Available: <http://www.engineering.uiowa.edu/~amalek/papers/Multi-hand%20prosthesis.pdf>
- [27] L. Carvajal, "Diseño de un método para capturar señales mioeléctricas de miembros superiores," Florencia-Caquetá, p. 10. [Online]. Available: <http://uametodologia.files.wordpress.com/2011/05/articulo-metodologia2.pdf>
- [28] R. Okuno, M. Yoshida, and K. Akazawa, "Compliant grasp in a myoelectric hand prosthesis," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 24, pp. 48–56, July-August 2005.
- [29] A. Alonso Alonso, R. Hornero Sánchez, P. Espino Hurtado, R. De la Rosa Steinz, and L. Lip-tak, "Entrenador mioeléctrico de prótesis para amputados de brazo y mano," *Mapfre Medicina*, vol. 13, no. 1, pp. 11–19, 2002.
- [30] C. Pylatiuk, S. Mounier, A. Kargov, S. Schulz, and G. Bretthauer, "Progress in the development of a multifunctional hand prosthesis," *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp. 4260 – 4263, Septiembre 2004.
- [31] P. Ventimiglia (LA& E), "Design of a human hand prosthesis," Bachelor of Arts, Worcester Polytechnic Institute, Abril 2012. [Online]. Available: <http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042612-145912/3.pdf>
- [32] J. Pelletier, "Touch bionics i-limb prostheses," *Biomedical Engineering*, vol. Second Presentation, April 2013. [Online]. Available: <http://www.ele.uri.edu/Courses/bme181/S13/1JustinP2.pdf>
- [33] MEC 11 Raising the Standard, "Bebionic prosthetic design," p. 4, August 2011. [Online]. Available: <http://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/4733/4320Medynski.pdfsequence=1>
- [34] S. Micera, X. Navarro, J. Carpaneto, L. Citi, O. Tonet, P. M. Rossini, M. Chiara Carrozza, K. P. Hoffmann, M. Vivó, K. Yoshida, and P. Dario, "On the use of longitudinal intrafascicular peripheral interfaces for the control of cybernetic

- hand prostheses in amputees,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 16, no. 5, pp. 453–472, Noviembre 2008.
- [35] S. Micera, J. Carpaneto, and S. Raspopovic, “Control of hand prostheses using peripheral information,” *IEEE Consumer Electronics Society Technical Co-Sponsor*, vol. 3, pp. 48–68, Diciembre 2010.
- [36] P. Dario, M. Chiara Carrozza, E. Guglielmelli, C. Laschi, A. Menciassi, S. Micera, and F. Vecchi, “Robotics as a future and emerging technology: biomimetics, cybernetics, and neuro-robotics in european projects,” *IEEE Robotics and Automation Society*, vol. 12, pp. 29–45, Junio 2005.
- [37] H. Lorenzo Yustos, J. A. Álvarez Ordoñez, P. Lafont Morgado, J. L. Muñoz Sanz, and J. Muñoz García, “Mecanismo articulado de mano de maniquí,” octubre 2007. [Online]. Available: <http://www.arteuna.com/talleres/lab/maquinariasantiguas.pdf>
- [38] J. E. Bernal Peña, “Análisis numérico y experimental para la caracterización de un material con memoria de forma,” Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad en Diseño, Instituto Politécnico Nacional, Junio 2012. [Online]. Available: <https://www.geociencias.unam.mx/geociencias/posgrado/tesis/perezse.pdf>
- [39] D. Stoeckel, “The shape memory effect - phenomenon, alloys and applications,” California 94539, pp. 1–13, 1995. [Online]. Available: <http://www.nitinol.com/media/reference-library/038.pdf>
- [40] J. Hoon Lee, S. Okamoto, and S. Matsubara, “Development of multi-fingered prosthetic hand using shape memory alloy type artificial muscle,” *Computer Technology and Application*, vol. 3, pp. 477–484, July 2012. [Online]. Available: <http://www.davidpublishing.com/davidpublishing/Upfile/9/7/2012/2012090701476385.pdf>
- [41] E. Kaplanoglu, “Design of shape memory alloy-based and tendon-driven actuated fingers towards a hybrid anthropomorphic prosthetic hand,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, pp. 1–6, Julio 2012.
- [42] S. Herranz Moreiro, “Contról de posición de un material con memoria de forma (SMA),” pp. 1–90, Marzo 2011. [Online]. Available: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/11642/1/PFC_Saul_Herranz_Moreiro.PDF
- [43] A. Lendlein and S. Kelch, “Shape-memory polymers,” *Angewandte Chemie*, pp. 2034 – 2057, 2002. [Online]. Available: <http://www.eng.buffalo.edu/Courses/ce435/Lendlein02.pdf>
- [44] Y. Bar-Cohen, “Artificial muscles using electroactive polymers (eap): Capabilities, challenges and potential,” p. 14, Septiembre. [Online]. Available: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/37602/1/05-1898.pdf>